

**3º Congreso Iberoamericano sobre hormigón autocompactante
Avances y oportunidades
Madrid, 3 y 4 de Diciembre de 2012**

Prototipo de la fabricación de una bóveda con hormigón autocompactable con fibras poliméricas. Lecciones aprendidas

A. Pacios Álvarez

Departamento de Mecánica Estructural y Construcciones Industriales, Universidad
Politécnica de Madrid, España

P. Tanner

CESMA Ingenieros, Madrid, España

J.M. Márquez Zárate

Estudio de arquitectura José Miguel Márquez, Sta Cruz de Tenerife, España

RESUMEN

La realización de obras en las que se emplean materiales no tradicionales lleva asociada una complejidad estructural y constructiva. Con la comprobación in situ mediante la realización de un prototipo, se podrá poner a punto los equipos materiales y personales, los procedimientos de definición y ejecución, modelos de cálculos utilizados, etc. Con este objetivo se realizó un prototipo de una bóveda representativa a escala real que permitiera: seleccionar la dosificación de hormigón, entre las estudiadas previamente; optimizar el proceso de colocación, ajustando la localización de los puntos de hormigonado; y comprobar la adecuación de los equipos de hormigonado. Con las lecciones aprendidas de la fabricación de este prototipo se plantearon las modificaciones que se deben incorporar en obra. La experiencia adquirida llevó a modificar las fases de hormigonado y permitió adaptar los materiales al elemento construido.

PALABRAS CLAVE: autocompactante reforzado con fibras, fibras polipropileno, refuerzo de RPFV, proceso de ejecución.

1.- INTRODUCCIÓN

La realización de obras en las que se emplean materiales no tradicionales lleva, además de la complejidad estructural asociada a la idoneidad del modelo y caracterización de los materiales, una complejidad constructiva relacionada con la puesta a punto del proceso. Esto es debido tanto a la falta de información acerca de las incidencias que se pueden producir en la puesta en obra como a la falta de estrategia en la toma de decisiones para resolver dichas incidencias. La mejor manera de solventarlo es la comprobación in situ mediante la realización de un prototipo, que permitirá poner a punto los equipos materiales y personales, los procedimientos de definición y ejecución, modelos de cálculos utilizados, etc. [1, 2].

Prototipo de la fabricación de una bóveda con hormigón autocompactable ...

En este trabajo se presenta la definición y construcción de un prototipo representativo de bóveda. Previamente a la fabricación del prototipo se realizó un estudio sobre la dosificación del hormigón autocompactante reforzado con fibra de polipropileno (HACRFP), ajustándose a los siguientes criterios de diseño:

- Características geométricas:
 - Espesores mínimos. Se considera el espesor más desfavorable de 8 cm en la plementería de la bóveda.
 - Espaciamiento entre barras de armadura. Las características del doblado de las barras de resina de poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV) propicia que se encuentren barras juntas [3].
- Aspectos singulares de agresividad del medio. Se diseña un HAC para cumplir con los contenidos mínimos de cemento y relación máxima de agua/cemento de un hormigón en ambiente IIa, aunque podrían cumplirse con las especificaciones del ambiente IIIa (más restrictivo).
- Fabricación de los elementos. Inicialmente se plantea la construcción con elementos prefabricados; en la fabricación de los segmentos el hormigón tendrá un recorrido horizontal de 7 m aproximadamente y pendiente del llenado máxima de 45°, quedando establecida dicha autocompactabilidad con un escurrimiento mínimo superior a 650 mm. Al modificarse la ejecución a una construcción in situ, es necesario comprobar si la clase de autocompactabilidad definida es adecuada.
- Método de puesta en obra. Dada las limitaciones de acceso a la obra se deberán valorar las alternativas de utilizar tanto bomba con cubilote en la puesta en obra.

Al prototipo se le ha añadido un murete y losa de cimentación para absorber las reacciones en la prueba de carga de la carga aplicada; los valores de carga y resultados de deformación no se incorporan en este estudio.

La fabricación del prototipo se ha estructurado en cuatro fases: hormigonado de la losa de cimentación, hormigonado de los muretes, hormigonado de los pilares y hormigonado de la bóveda. Se buscaba seleccionar la dosificación de hormigón que permitiera una mejor colocación, localización de los puntos de hormigonado y comprobar la adecuación del equipo utilizado (cubilote y bomba) y control de calidad.

Con las lecciones aprendidas de la fabricación de este prototipo se plantearon las modificaciones que se deben incorporar en obra.

2.- ELEMENTOS DEL PROTOTIPO

La Figura 1 muestra una imagen del modelo del prototipo de la bóveda en la que se identifican los elementos principales. La bóveda está formada por dos arcos formeros (paralelos a la dirección de la nave principal) de luz 7,38 m y dos arcos fajones (ortogonales a aquella) de luz 11,010 m. Ambos arcos están definidos por sendos nervios de borde de sección rectangular de 100 mm de anchura por 280 mm de canto. En las diagonales se disponen unos nervios de sección también rectangular de 200 mm de anchura por 280 mm de canto. El espesor de la bóveda es de 8 cm en todo su desarrollo. Para sustentar toda la estructura se disponen cuatro pilares cuadrados de 275

mm de lado. La losa de cimentación y los muretes son los elementos especiales del prototipo diseñados para la transferencia de cargas en la prueba.

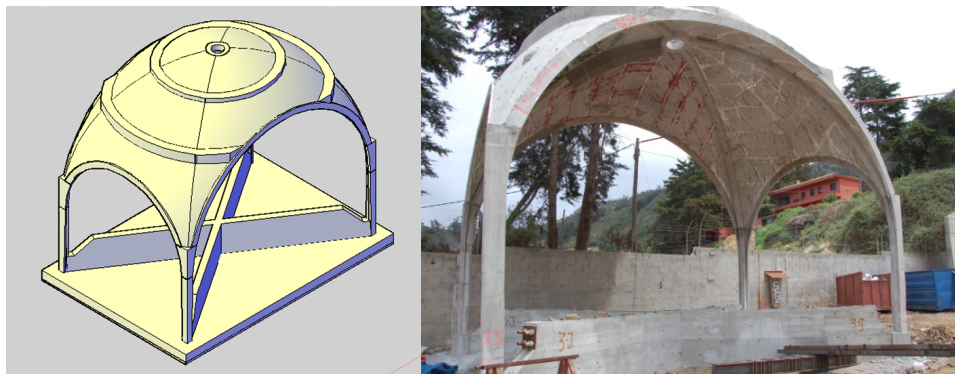


Figura 1. Modelo y fabricación del prototipo de bóveda

2.1.- Muretes-reacción

La ejecución de la losa de cimentación y los muretes han servido para optimizar la fabricación del HACRF y el control de recepción del material. Los muros del prototipo, en disposición de cruz, tienen una altura de 1,50 m y una anchura de 30 cm. Estos elementos están fuertemente armados con acero B500S; el refuerzo de los muros consiste en armadura vertical $\phi 16$ cada 10 cm y armadura horizontal $\phi 12$ cada 20 cm. Embebidos en los muros se encuentran pares de barras verticales de $\phi 47$ mm con un zunchado de 2 estribos $\phi 12$ cada 20 cm aproximadamente. Adicionalmente en la parte superior se han incorporado 6 barras horizontales de $\phi 43$ (ver Figura 2).

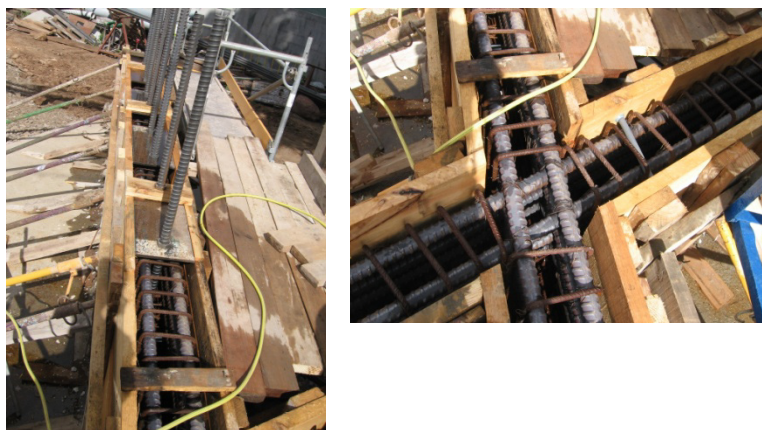


Figura 2. Muretes de reacción de la bóveda

El hormigón utilizado es HAF-35/P-2-1,5/AC-E2/12-45/IIa, que se suministra en obra en camiones de 4 m³. Inicialmente se plantearon dos dosificaciones. Las dosificaciones empleadas se encuentran en la Tabla 1 [4, 5].

Tabla 1. Dosificaciones de HAF-35/P-2-1,5/AC-E2/12-45/IIa

Materiales componentes (kg/m³)	HACRF-4	HACRF-8
Agua	190,00	211,00
Cemento 42,5 R	400,00	380,00
Grava 4/10	419,41	553,00
Arena 0/4 – Arena 0/3	1087,95 -	590,00 - 280,00
Filler	250,00	300,00
Aditivo tipo 1 - Aditivo tipo 2	12,540 -	9,600 – 1,44
Fibra tipo 1	7,000	6,000
Volumen de pasta (%)	43	46
Relación A/C	0,48	0,56
Relación A/finos	0,29	0,31

Para contrastar la idoneidad de equipos de puesta en obra, dado que es necesario disponer de alternativas, se hormigonaron estos elementos con cubilote. Se dispusieron de dos elementos diferentes: uno con embocadura directa de 0,3 m³ y otro con bandeja inclinada de transición de mayor volumen; ambos cubos se manejaban con un camión-grúa. Se inició la colocación del material en el punto más complejo de hormigonado por la elevada densidad de armadura.

Dada la relación existente entre los reducidos espacios libres para hormigonado reducidos (separación entre barras de 60 mm) y la boca del cubilote, era necesario controlar la descarga del material para que se permitiera al HAC fluir. Este ajuste manual dificultó la tarea y ocasionó retrasos en la colocación; el material suministrado por los siguientes camiones se colocó al límite de tiempo y se llegó a rechazar material. Esta prueba de hormigonado ha servido para controlar de calidad del hormigón readitivado o colocado a 90 minutos; con ello se dispone de una trazabilidad de su comportamiento.

2.2.- Pilares

La principal dificultad encontrada en el hormigonado de los pilares es la geometría, la reducida sección de los pilares a 1/4 de la real, y la adaptación de la armadura de RPFV de ϕ 8 mm y ϕ 16 mm, con radios de curvatura muy superiores a los de acero.

La Figura 3 muestra la sección variable de un pilar y el armado de los mismos. Para el hormigonado de estos elementos se utilizó un HAC sin refuerzo de fibra (HA-35/AC-E2/12/IIa). Se practican 2 ventanas distanciadas 1,50 m entre sí, en la altura de 4,65 m para poder verter lateralmente, mediante el empleo de una canal.

El relleno de los pilares se realizó con bomba, con conducto de 125 mm de diámetro. El rendimiento de la bomba era elevado lo que supuso dificultades en los tiempos de coordinación para el vertido. El suministro de los camiones con hormigón era mucho

más ajustado, dada la experiencia adquirida con el hormigonado de los muretes. Durante este proceso no surgió ninguna incidencia.

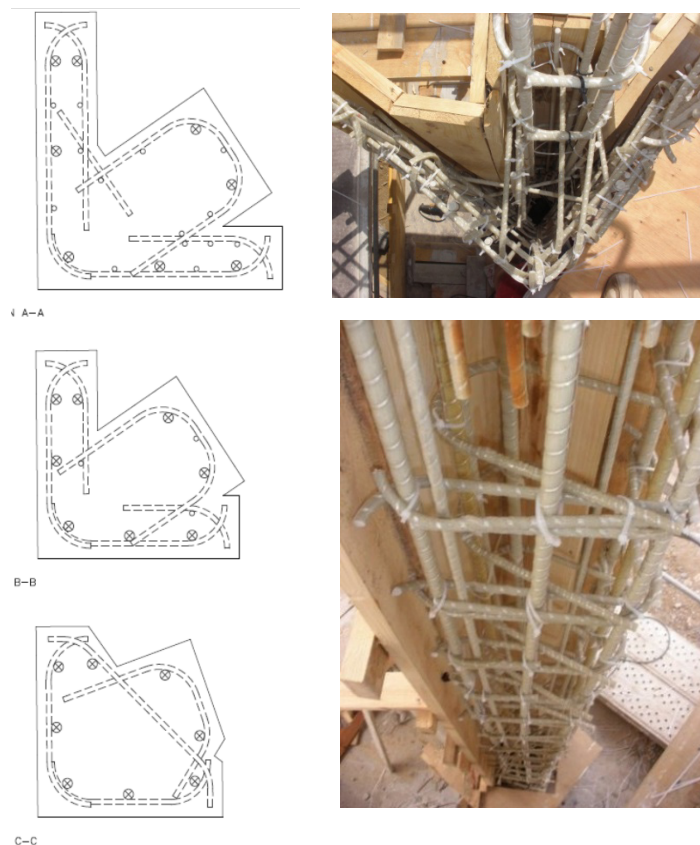


Figura 3. Secciones y armado de los pilares

2.3.- Bóveda

La particularidad que presenta el prototipo es que los arcos formeros tiene un ancho más reducido que los originales (10 cm), dado que en obra se comparten con dos bóvedas. Unido al reducido espesor de la plementería y a la necesidad de disponer de tirantes del encofrado y separadores se identifican varias áreas de gran dificultad de hormigonado, a pesar de no tener un armado denso. Como se puede observar en la Figura 4, los cruces de armadura, separadores y tirantes forman zonas en las que el hormigonado va a ser crítico. Al igual que los pilares, la colocación se realizó por bombeo.

Una diferencia entre el prototipo y la bóveda real está en que para poder aplicar la carga, se incorporaron dos anillos con refuerzo de armadura de acero. Por esta singularidad se sitúan las bocas de hormigonado en la cara superior de estos anillos. Se disponían de ventanas de visualización para hacer un seguimiento al relleno de los encofrados.

Prototipo de la fabricación de una bóveda con hormigón autocompactable ...

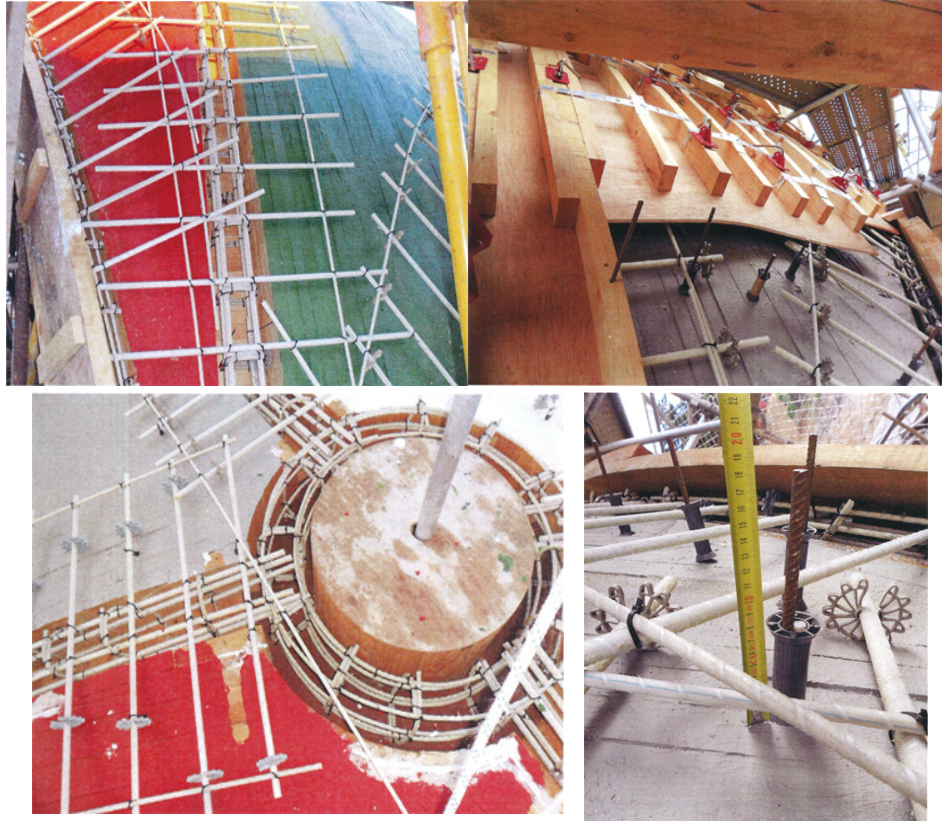


Figura 4. Detalle de armadura de los nervios y plementería de la bóveda

En todas las tareas de hormigonado se realiza una toma de muestra para el control de recepción a la llegada del camión y se recomienda una segunda entre 1/4 y 3/4 de la descarga.

3.- INCIDENCIAS ENCONTRADAS EN LA FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO

Las incidencias se han atendido en obra y se han solventado con mayor o menor dificultad. Las incidencias en puesta en obra del HAC se estructuran en las siguientes categorías:

- a) Recepción del material: necesidad de establecer el momento de realizar los ensayos de control, las responsabilidades del proceso y los criterios de aceptación y/o rechazo.
- b) Dificultad en la colocación del hormigón: necesidad de adecuar los medios auxiliares de colocación disponibles con las características del HAC, la secuencia de hormigonado y las responsabilidades en el proceso.
- c) Frecuencia de suministro de hormigón: necesidad de planificar y ajustar la frecuencia de suministro del material en obra teniendo en cuenta los equipos a

utilizar en su colocación y si es necesario o no el cambio de ubicación de los mismos.

Se ha puesto especial énfasis en identificar las responsabilidades de cada agente. Todos los agentes deberán conocer y aceptar los criterios de rechazo.

3.1.- Acerca de la fabricación del hormigón

Es responsabilidad del Fabricante de Hormigón suministrar un material que cumpla con las especificaciones de proyecto en el momento de iniciar la colocación del mismo. Para ello aplicará el control interno para garantizar que durante el suministro se ajusta a los parámetros establecidos en las comprobaciones experimentales previas al suministro.

- La autocompactabilidad es propiedad crítica en la recepción del material (E2 implica $650 \leq d_f \leq 750$). Se considera que durante un periodo de transporte superior a los 30 minutos el hormigón puede sufrir una pérdida de autocompactabilidad que requiera realizar el ajuste en obra (sin superar los valores máximos establecidos).
- El aditivo 1 tiene unas mejores prestaciones si se incorpora en un hormigón plástico. Se puede aumentar la dosificación del aditivo 2 para conseguir este efecto.
- Se recomienda que el hormigón se haya colocado antes de alcanzar 60 minutos desde su fabricación, si bien la normativa vigente autoriza la colocación con un tiempo de fabricación de 90 minutos.
- Como información adicional se recomienda registrar el valor indicado en el watímetro al inicio del transporte, al final del transporte, antes y después de incorporar aditivo en obra.

3.2.- Acerca de la recepción del hormigón

Es responsabilidad de la Dirección de Obra realizar un control de recepción sobre el hormigón suministrado. El Laboratorio de Control asistirá en esta actividad, aunque no es su responsabilidad aceptar o rechazar el material.

- Se deberá realizar una primera operación de muestreo en el inicio de la descarga para verificar, de manera preliminar, la conformidad con los requisitos de consistencia. Si la Dirección de Obras considera aceptable el hormigón para su descarga, se procederá a repetir la medición de autocompactabilidad con la muestra extraída entre 1/4 y 3/4 de la descarga y el valor obtenido en esta oportunidad será el que se registre. La toma de muestra y los ensayos de escurrimiento y tiempo de flujo en embudo deberán realizarse en tiempo máximo de 15 minutos.
- En elementos que carezcan de armadura o con muy poca armadura se puede renunciar a la realización del ensayo de escurrimiento con anillo J. Sin embargo si la Dirección de Obra indica que se debe realizar, el tiempo máximo de realización de ensayos se podrá aumentar a 20 minutos.
- Se rechazarán hormigones con un escurrimiento inferior a 600 mm o segregados.

Prototipo de la fabricación de una bóveda con hormigón autocompactable ...

3.3.- Acerca de la colocación del hormigón.

Es responsabilidad de la Empresa Constructora poner todos los recursos para la correcta ejecución de esta actividad.

- Se deberá determinar previamente al inicio del hormigonado y una vez estudiada la dificultad del elemento, la secuencia de hormigonado y frecuencia de suministro de material.
- Los medios de puesta en obra, distribución y compactación (como medida auxiliar si fuera necesario) del hormigón deberán ser sometidos a la aprobación del Director de Obras, debiendo disponer siempre de al menos un elemento de recambio para sustituir aquellos en uso ante un mal funcionamiento eventual.
- El hormigonado será de abajo a arriba, tanto si se coloca con bomba como con cubo.
- La Dirección de Obra deberá autorizar la utilización de medidas mecánicas de vibrado si por dificultad en el hormigonado hubiera que recurrir a ellos.

3.4.- Acerca de la recepción del elemento.

Es responsabilidad de la Dirección de Obra verificar la geometría y acabado del elemento. Si el acabado del mismo no es el deseado, deberá presentarse a la Dirección de Obra un plan de reparaciones que deberá ser aprobado antes de su aplicación.

Los defectos que hayan podido producirse al hormigonar deberán ser comunicados al Director de las Obras, junto con el método propuesto para su reparación. Una vez aprobado éste, se procederá a efectuar la reparación en el menor tiempo posible.

La Figura 5 muestra el resultado de la fabricación del prototipo, junto con el resultado de la construcción de una bóveda real.



Figura 5. Resultado final de la fabricación del prototipo y bóveda real

4.- PRÓXIMAS ACTUACIONES. LECCIONES APRENDIDAS

La colocación de un hormigón de características especiales en una obra singular requiere de un “equipo del hormigón” que reunirá a todos los agentes involucrados en el proceso. Las actividades de fabricación y colocación dispondrán tanto de un control interno como de un control de recepción.

Con el objeto de eliminar incertidumbres en obra, se recomienda que antes del inicio de cada fase de hormigonado de diferente configuración (por ejemplo pilares, muros, bóveda, ...) se establezca un procedimiento, conocido y aceptado por todos los agentes, en el que se describa el proceso de construcción y las responsabilidades de cada agente. Durante la fabricación del prototipo y en la construcción de las primeras bóvedas reales, es muy recomendable que este procedimiento se fije en una reunión previa del “equipo de hormigón”, así como que se recojan todas las incidencias en una reunión final.

4.1.- Aseguramiento de la calidad del prototipo

Se tendrán en consideración las siguientes medidas adicionales:

- Control acústico de la totalidad del encofrado para detectar las zonas a las que no ha llegado el hormigón o se ha podido producir un hormigonado defectuoso.
- Apertura de ventanas en estas zonas y relleno con un hormigón equivalente al empleado en el hormigonado de la cúpula, pero sin fibras.
- Desencofrado a los tres días de la finalización de esta operación.
- Reparación de los defectos que se detecten después del desencofrado.

4.2.- Ejecución en obra

Teniendo en cuenta la experiencia acumulada en la ejecución del prototipo, se consideran dos opciones para la ejecución de las cúpulas en obra: Opción A, ejecución de arcos y cáscaras en una fase; Opción B, ejecución de arcos y cáscaras en dos fases con distintos materiales. A priori, ambas son válidas y es el contratista quien debe optar por una u otra.

Independientemente de la opción se adoptarán las siguientes medidas:

- Industrialización de encofrado y contraencofrado, lo que incluye la minimización del número de tirantes entre ambos, así como una disposición de los mismos que facilite el flujo del hormigón.
- Apertura de ventanas en el contraencofrado tanto en los arcos como en las cáscaras. La disposición y la separación de las ventanas se elegirán en concordancia con los medios empleados para la puesta en obra de los hormigones, de modo que ésta se pueda realizar sin interrupciones.
- Adecuar los medios empleados para la puesta en obra del hormigón (por ejemplo, reducir el rendimiento de la bomba para asegurar la continuidad del hormigonado; etc.).
- Mejorar la homogeneidad de la autocompactabilidad del HACRF y establecer criterios claros para su recepción. Evitar el vibrado del hormigón.

Prototipo de la fabricación de una bóveda con hormigón autocompactable ...

La dirección facultativa y la empresa constructora optaron por la opción B. Es importante seguir las siguientes recomendaciones:

- Los arcos de hormigón armado se ejecutan en una primera fase, con HAC, igual que los pilares.
- Las cáscaras se realizan en una segunda fase, utilizando HACRF. A estos efectos, los nervios ejecutados en la primera fase se pueden utilizar para la fijación del contraencofrado de las cáscaras. Si este contraencofrado se rigidiza en su cara exterior, es posible concebir un sistema que reduce los tirantes, facilitando el flujo del hormigón con fibras.
- La junta de hormigonado entre las dos fases se sitúa a 0,1 m del final de las barras de cosido arco-cáscara.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración prestada por las siguientes personas, en representación de los equipos que coordinan: Primitivo Elías Gil e Hildebrando Díaz Rodríguez (VICTOR RODRÍGUEZ E HIJOS SLU), Vicente Iglesias Álvarez (ÁRIDOS y HORMIGONES GOMERA), Javier Jubera Pérez (Área de Laboratorios y calidad de la construcción de la Consejería de Obras Públicas y Transportes del Gobierno de Canarias), así como a José Pedro Gutiérrez Jiménez y Pedro Carballosa de Miguel (IETcc).

REFERENCIAS

- [1] TANNER, P., LÓPEZ, C. y BELLOD, J.L. Conexiones y otros asuntos para modelos experimentales. En: 2º Congreso de Puentes y Estructuras de Edificación de ACHE, Comunicaciones, vol. 1 (Asociación Científico-técnica de Hormigón Estructural, ACHE, Ed.), Madrid (2002). ISBN 84-89670-37-4. pp. 619-635.
- [2] GÜEMES, A., TANNER, P. and BELLOD, J.L. *Internal strains monitoring of a brick / concrete vault by fiber optics sensors*. In: Composites in construction (Figueiras, Juvandes, Faria, Eds.). Lisse, A.A. Balkema, Publishers (2001). ISBN 90 2651 858 7.
- [3] ALKHRDAJI, T., M.A. WIDEMAN, A. BELARBI, AND A. NANNI, "Shear Strength of GFRP RC Beams and Slabs", Proc., CCC 2001, Composites in Construction, J Figueiras, L. Juvandes and R. Furia, Eds., Porto, Portugal, Oct. 10-12, (2001), pp. 409-414.
- [4] CARBALLOSA DE MIGUEL, P.; PACIOS ÁLVAREZ, A.; GUTIÉRREZ JIMÉNEZ, J.P.; y TANNER, T., Diseño optimizado de un hormigón autocompactante reforzado con fibra de polipropileno con función estructural, para el empleo en rehabilitación, Congreso Internacional de Estructuras. V Congreso de ACHE (2011) ISBN 997-84-89670-73-0, pp. 147-148.
- [5] PACIOS-ÁLVAREZ, A.; CARBALLOS DE MIGUEL, P.; GUTIÉRREZ-JIMÉNEZ, J.P.; and TANNER, P., Polypropylene fiber-reinforced self-compacting concrete for the reconstruction of the cathedral of La Laguna, Canary Island, Spain, 9th Symposium on High Performance Concrete. Design, Verification and Utilization, Rotorua, New Zealand, 9-11 August 2011 (2011) Book of Abstracts and CD (8pp).